

方钢管混凝土框架内置开洞薄钢板剪力墙抗震性能试验研究

马尤苏夫¹, 王先铁², 刘立达², 贺 博²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究方钢管混凝土框架内置开洞薄钢板剪力墙的抗震性能, 对4个单跨2层1/3比例的方钢管混凝土框架内置薄钢板剪力墙试件进行了低周反复荷载试验, 4个试件分别采用中部开洞、单侧开洞、两侧开洞和未开洞钢板剪力墙。研究了开洞形式对方钢管混凝土框架内置薄钢板剪力墙抗震性能的影响, 并与方钢管混凝土框架内置未开洞薄钢板剪力墙进行对比。得到了试件的滞回曲线、骨架曲线、各阶段的荷载和位移值及抗震性能指标, 分析了结构的破坏特征、延性、耗能能力、承载能力及刚度退化等力学性能。结果表明: 4个试件均能够发挥钢板剪力墙的屈曲后强度, 滞回性能稳定, 延性较好, 承载力退化平缓。中部开洞薄钢板剪力墙被加劲肋分隔为宽厚比较小的区格, 耗能能力优于其余3个试件。洞口边缘构件端部连接焊缝撕裂影响了单侧开洞和两侧开洞钢板剪力墙性能的充分发挥。钢板剪力墙开洞一定程度上降低了结构承载力和抗侧刚度, 但提高了耗能能力。钢板剪力墙洞口边缘构件应具有足够的强度、刚度及连接强度。

关键词: 方钢管混凝土框架; 开洞薄钢板剪力墙; 抗震性能; 试验研究

中图分类号: TU 398.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0681-10

Study on the seismic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear wall with openings

MA Yousufu¹, WANG Xiantie², LIU Lida², HE Bo²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior of the concrete-filled square steel tubular frame(CFSST)-thin steel shear plate walls(SPSWs) with openings, four one-third scaled one-bay and two-story CFSST-SPSWs specimens were designed for quasi-static experiments. The SPSWs of specimens were with middle openings, one side opening, two side openings and with no opening, separately. The influences of opening on the seismic behavior of SPSWs were investigated for CFSST-SPSWs, which were compared with the CFSST-SPSWs without opening. The hysteretic loops, skeleton curves, the load and displacement values for different loading stages and seismic behavior index were obtained. The failure characteristic, ductility, energy dissipation capacity, load bearing and stiffness degradation were studied. The results show that the post-buckling strength of the SPSWs of four specimens is developed. All the specimens have stable hysteretic behavior, good ductility and stable load bearing capacity degradation. The SPSWs with middle openings are divided into small zone with smaller width-to-thickness ratio by stiffeners. The energy dissipation capacity of the SPSWs with middle openings is better than the others'. The load bearing capacity of SPSW with one side and two side opening is affected by the weld tearing of the stiffeners surrounding the openings. The openings of the SPSWs decrease the load bearing capacity and lateral stiffness, but improve the energy dissipation. The strength, stiffness and the connection of the stiffeners surrounding the openings should be adequate in developing the tension field.

Key words: concrete-filled square steel tubular frame; steel plate shear wall with opening; seismic behavior; experimental study

钢板剪力墙(以下简称钢板墙)结构是由内置钢板、竖向边缘构件及水平边缘构件组成的一种新型抗侧力结构体系^[1]。薄钢板墙利用屈曲后形成的拉力带抵抗水平荷载, 具有自重轻、延性好、抗震性能优异及经济性好等优点^[2]。

竖向边缘构件采用H型钢时, 易在拉力场作用下发生破坏而导致结构整体扭转和失稳, 影响薄钢板墙性能的发挥^[3]。相较于钢框架, 方钢管混凝土框架具有更高的刚度、强度及更好的滞回性能和延性, 且强度和刚度退化平缓^[4-6]。因此, 采用方钢管

混凝土柱作为薄钢板墙的竖向边框, 可满足薄钢板墙对竖向边缘构件的强度和刚度需求, 有效避免传统薄钢板墙竖向边缘构件易过早失效的问题, 充分发挥方钢管混凝土柱与薄钢板墙的结构性能。

钢板墙通常作为筒体的一部分布置在建筑结构平面的中心位置, 而在高层建筑设计中, 常将电梯井及各类水电管线等布置于核心筒位置。为满足使用功能要求, 需在钢板墙上开设电梯门洞、设备管道洞口等。Hitaka等^[7]对两边连接开竖缝钢板墙进行了单调加载试验和拟静力试验。结果表明, 随着

开缝间距减小, 钢板墙的破坏形态由整体剪切屈曲逐渐转变为竖缝间钢板条带的局部扭转. Choi等^[8]对四边焊接、两边焊接、四边螺栓连接及中间开洞联肢钢板墙进行了抗震性能试验研究和理论分析. 聂建国等^[9-11]对3个钢板剪力墙试件进行了低周反复荷载试验, 基于试验结果提出了开洞钢板墙的承载力模型. 郝际平等^[12]对两个单层单跨开洞薄钢板墙进行了拟静力试验, 研究了开洞薄钢板墙的弹性侧向刚度和承载力、受力机理、破坏机制、延性和耗能能力. 李峰^[13]对不同加劲形式、开洞形式下的四组钢板墙试件进行了拟静力试验. 结果表明, 四组钢板墙均具有较高的刚度、强度和较好的耗能能力. 综上所述, 开洞钢板墙具有较高的侧向刚度和承载力, 良好的延性和耗能能力. 开洞可以满足建筑需求, 同时调节钢板墙与框架刚度比的作用. 但竖向边缘构件大多为H形截面, 对以方钢管混凝土柱作竖向边缘构件的开洞钢板墙研究较少.

笔者所在课题组前期对方钢管混凝土框架内置开洞薄钢板墙结构的抗震性能进行了理论分析和数值模拟. 为进一步研究方钢管混凝土框架内置开洞薄钢板墙的抗震性能, 对方钢管混凝土框架内置中部开洞、单侧开洞及两侧开洞薄钢板剪力墙进行了拟静力试验研究, 并与方钢管混凝土框架内置未开洞薄钢板墙进行对比.

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了4个1/3比例的单跨两层试件. 其中, 三个为开洞薄钢板墙试件, 分别为中部开洞薄钢板墙 (SPSW-CO)、单侧开洞薄钢板墙 (SPSW-SO) 及两侧开洞薄钢板墙 (SPSW-BSO); 另一个为未开洞薄钢板墙对比试件 (SPSW-BS). 所有试件的框架完全相同. 试件几何尺寸见图1.

钢板墙的顶梁和底梁承受了较大的单侧拉力场作用下. 而中梁两侧的拉力场作用可相互抵消, 因此, 中梁受力较小. AISC-341要求在开洞钢板墙洞口四周设置贯通的纵、横向局部边缘构件进行加强, 承担钢板墙屈曲后拉力场^[14]. 因此, 试件采用贴焊于钢板墙两侧的槽钢对洞口周边加劲. 当加劲肋具有足够刚度时, 钢板墙宽厚比可按加劲后的小区格考虑^[15], 试件 SPSW-CO、SPSW-SO、SPSW-BSO 与 SPSW-BS 钢板墙的宽厚比分别为 133、233、283和383. 根据文献[16]确定边缘构件和内置钢板墙的尺寸, 方钢管截面为□200×6, 顶梁

和底梁截面为 H300×150×10×12, 中梁截面 H200×100×10×12, 钢板墙厚3 mm, 洞口边缘的钢板两侧贴焊槽钢加劲肋, 槽钢尺寸为[5.

梁柱节点采用栓焊连接内隔板式节点. 钢板墙与鱼尾板采用双面角焊缝连接.

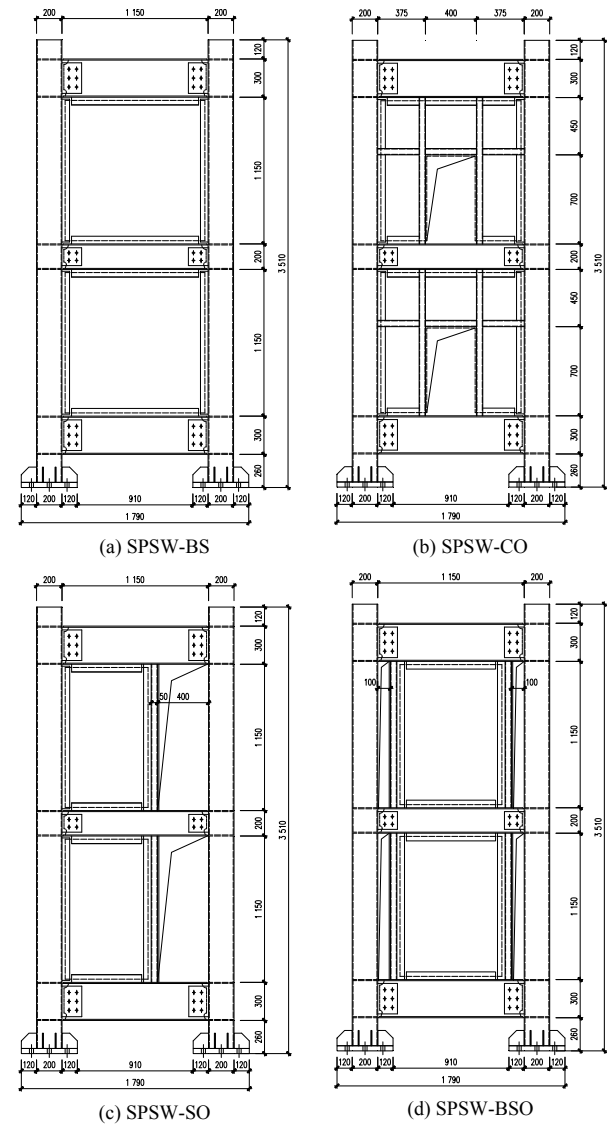


图1 试件尺寸

Fig.1 Dimension of specimens

1.2 材性参数

钢材均采用Q235B, 不同板厚钢材各取3个试样进行单向拉伸试验, 其力学参数取3个试样的平均值, 如表1所示. 方钢管内混凝土等级C30, 立方体抗压强度实测值为33.9 N/mm².

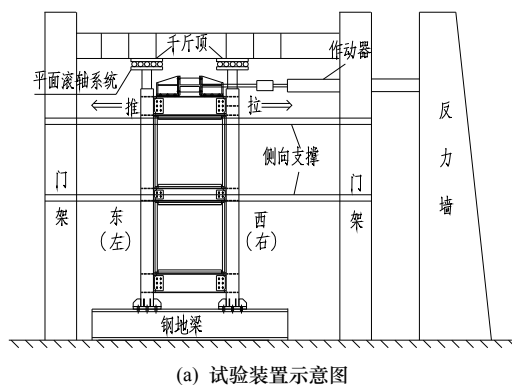
表1 钢材材料性能
Tab.1 Mechanical properties of steel

板厚(实测) /mm	屈服强度 f_y /N·mm ⁻²	抗拉强度 f_u /N·mm ⁻²	弹性模量 E /×10 ⁵ N·mm ⁻²	伸长率 δ /%
3(2.89)	334.43	484.60	2.16	34.01
6(5.43)	310.14	456.03	2.14	36.67
10(9.89)	282.46	430.14	2.05	39.09
12(11.92)	271.81	438.45	1.98	44.09

1.3 试验装置及加载制度

1.3.1 试验装置

试验装置如图2所示.通过两个油压千斤顶在方钢管混凝土柱顶施加400 kN竖向荷载.千斤顶通过带滚轴的滚动支座与反力梁连接.水平往复荷载通过两个1 000 kN MTS电液伺服程控作动器施加,作动器一端与反力墙连接,另一端与加载分配梁相连.该水平加载分配梁可实现两个作动器同步加载,防止试件发生扭转.框架柱两侧各设置两道带轴承的侧向支撑,防止试件平面外失稳.



(a) 试验装置示意图



(b) 水平加载分配梁

(c) 面外支撑

图2 试验装置
Fig.2 Test set-up

1.3.2 水平加载制度

水平往复荷载采取荷载-位移混合控制的加载制度^[17].试件屈服前荷载控制加载,400 kN前每级荷载增量为100 kN,400 kN后每级荷载增量为50 kN,加载至屈服荷载 P_y ,每级循环1圈.屈服后位移控制加载,以屈服位移 Δ_y 的倍数作为每级加载位移,每级循环3圈.加载制度如图3所示.规定推力为正向,拉力为反向.

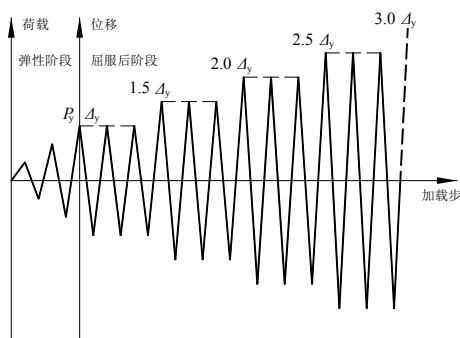
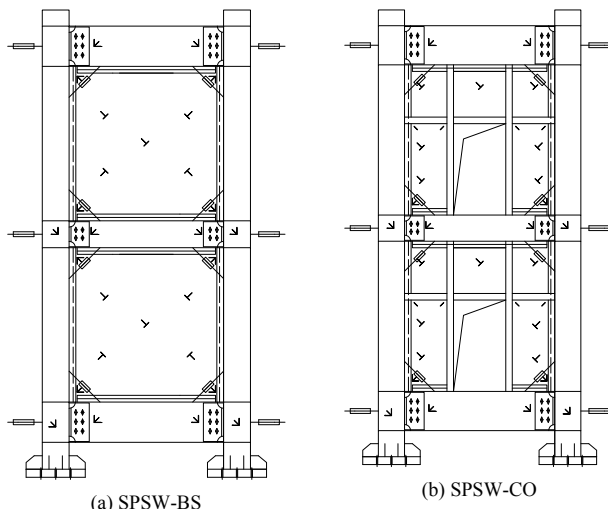


图3 加载制度
Fig.3 Loading system

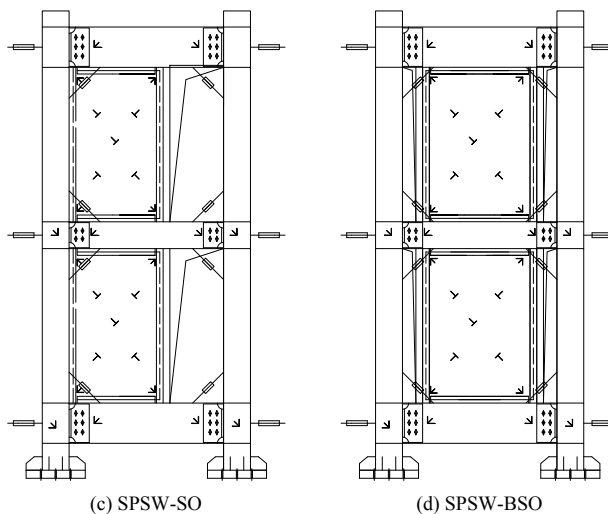
1.3.3 测点布置

位移计和应变片布置如图4所示.顶梁两端各布置1个量程为 ± 150 mm的位移计,中梁两端各布置1个量程为 ± 100 mm的位移计.方钢管柱节点域的腹板及梁端的腹板布置应变花,梁端上下翼缘布置应变片;钢板墙中部、角部以及其他应力较大的位置布置应变花和应变片.



(a) SPSW-BS

(b) SPSW-CO



(c) SPSW-SO

(d) SPSW-BSO

图4 位移计和应变片布置

Fig.4 Arrangement of displacement gauges and strain gauges

1.4 试验现象

1.4.1 试件SPSW-BS

试件SPSW-BS一、二层钢板墙的初始面外变形分别为3 mm、5 mm.

弹性阶段:正向荷载300 kN时,两层钢板墙均有微小面外变形,二层钢板墙中部偏左上屈服.正向荷载400 kN时,二层钢板墙左上屈服,卸载时钢板墙产生“呼吸效应”.反向荷载400 kN时,二层钢板墙中部偏右上屈服.正向荷载450 kN时,一层钢板墙中部和中部偏左上屈服,二层钢板墙中部偏

右下屈服。反向荷载450 kN时,二层钢板墙右上至左下对角线屈服。正向荷载500 kN时,两层钢板墙均沿对角线屈曲,形成拉力带。

弹塑性阶段:正向荷载550 kN时,荷载-位移曲线出现明显的转折,取屈服位移 Δ_y 为16 mm,此时一、二层钢板墙面外变形分别为8 mm、17 mm。一层钢板墙变形如图5(a)所示。位移 $1.5\Delta_y$ 时,左柱柱脚外侧钢管屈服。位移 $2.0\Delta_y$ 时,二层钢板墙右上、右下角沿拉力场方向撕裂,裂缝长度约25 mm(图5b)。位移 $2.5\Delta_y$ 时,一层钢板墙四角均被撕裂,二层左侧鱼尾板上端与柱壁焊缝撕裂(图5c),一、二层钢板墙面外变形分别为44 mm、30 mm。位移 $3.0\Delta_y$ 时,右柱柱脚外侧轻微鼓曲。

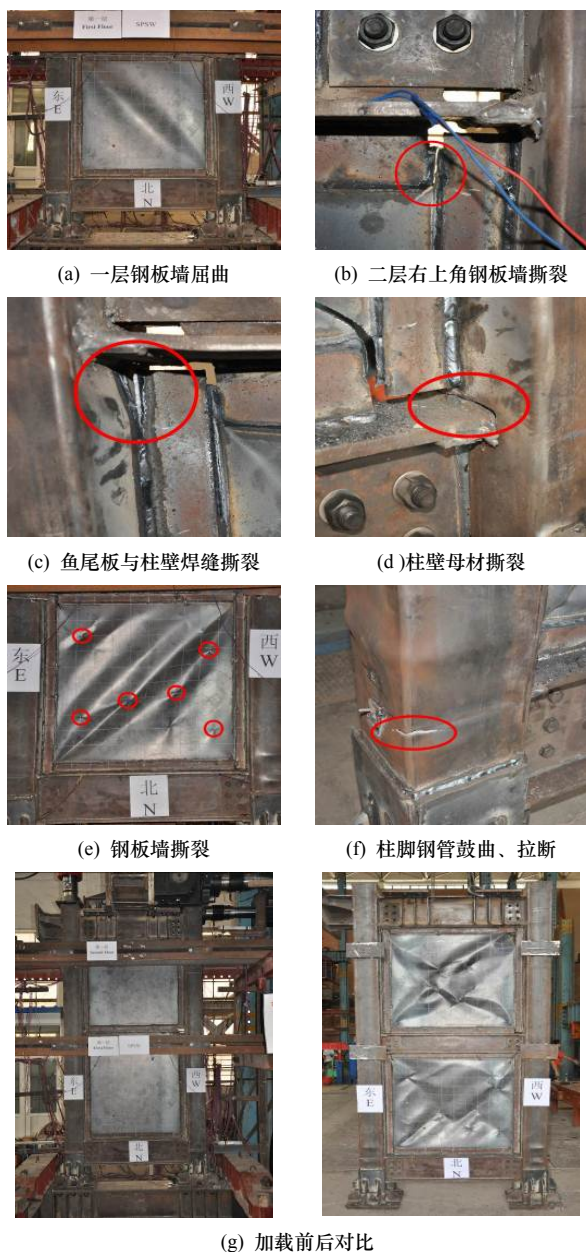


图5 SPSW-BE试验现象

Fig.5 Test phenomena of SPSW-BE

极限阶段:位移 $3.5\Delta_y$ 时荷载达到峰值,正反方向最大荷载分别为724.81 kN、-735.37 kN。中梁处柱壁母材撕裂(图5d)。位移 $4.0\Delta_y$ 时,柱壁在拉力场作用下微鼓。随着位移增大,两层钢板墙中部产生更多裂缝,裂缝长度逐渐增大(图5e)。位移 $4.5\Delta_y$ 时,两柱柱脚严重鼓曲。位移 $6.0\Delta_y$ 时,柱脚钢管被拉断(图5f)。位移 $6.5\Delta_y$ 时水平荷载降到峰值荷载的85%,试验结束。最终破坏形态见图5(g)。

1.4.2 试件 SPSW-CO

试件 SPSW-CO 一、二层钢板墙初始面外变形分别为6 mm、2 mm。

弹性阶段:正向荷载300 kN时,一层钢板墙洞口左侧区格左下角屈服。荷载从400~450 kN过程中,两层钢板墙中部与角部陆续屈服。450 kN时两侧柱脚进入塑性。

弹塑性阶段:正向荷载500 kN时,荷载-位移曲线出现明显的转折,取屈服位移 Δ_y 为16 mm,此时一、二层钢板墙最大面外变形分别为9 mm、7 mm,随后卸载过程中钢板墙产生“呼吸效应”。位移 $1.5\Delta_y$ 第一循环反向完成时,洞口两侧钢板墙严重屈曲,沿 45° 方向形成屈曲半波(图6a),板中内力形成拉力带。第二循环正向完成时,由于左柱柱脚处钢管内混凝土未浇灌密实,左柱脚外侧钢管轻微内凹。第二循环反向完成时,右柱柱脚轻微鼓曲。

极限阶段:位移 $2.0\Delta_y$ 第一循环,荷载达到峰值,正反方向最大荷载分别为593.56 kN、-545.15 kN,此时两层钢板墙最大面外变形均为14 mm。位移 $3.0\Delta_y$ 时,一层洞口右侧槽钢下端与底梁上翼缘焊缝产生裂纹(图6b),一层钢板墙洞口右上角区格轻微屈曲。由于槽钢与框架刚性连接,框架侧移时加劲肋共同受力,第二循环正向时,一层槽钢严重变形(图6c),一层钢板墙洞口右侧区格右上角撕裂,二层左侧鱼尾板下端与柱壁焊缝撕裂,洞口处中梁腹板在剪力作用下“起皮”(图6d)。位移 $4.0\Delta_y$ 时,一层钢板墙洞口两侧区格中部各有两处撕裂(图6e)。位移 $5.0\Delta_y$ 时,水平荷载为444.95 kN,试验结束。本级循环中两柱柱脚外侧钢管均被完全撕裂(图6f)。由于框架柱受压鼓曲后产生压缩变形,导致一层层高减小,一层钢板墙受压,钢板墙在压剪共同作用下破坏。最终破坏形态见图6(g)。

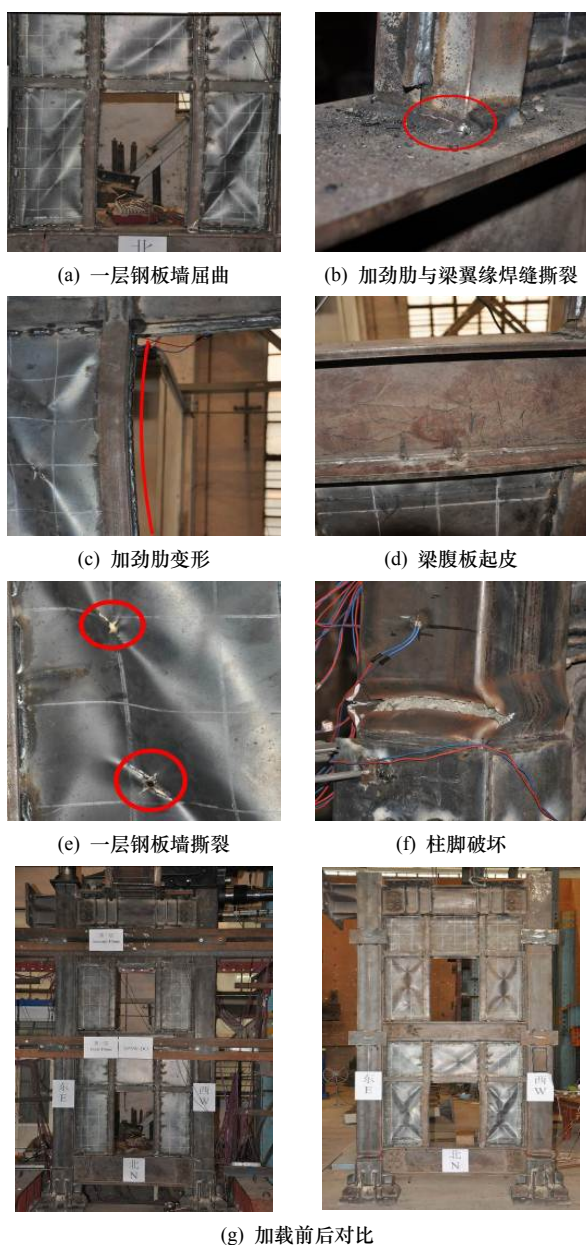


图6 SPSW-CO试验现象

Fig.6 Test phenomena of SPSW-CO

1.4.3 试件SPSW-SO

试件SPSW-SO一、二层钢板墙初始面外变形分别为5 mm、3 mm.

弹性阶段:正向荷载300 kN时,一层钢板墙中部偏左上屈服,二层钢板墙中心及左上角屈服.反向荷载300 kN时,对角线处钢板墙屈服.反向荷载400 kN时,右柱柱脚外侧钢管屈服,一、二层钢板墙左上至右下对角线屈服.

弹塑性阶段:正向荷载450 kN时,荷载-位移曲线出现明显的转折,取屈服位移 Δ_y 为24 mm,此时一、二层钢板墙面外变形分别为20 mm、16 mm.位移1.0 Δ_y 时一层槽钢在钢板墙拉力场作用下向内微弯,一层槽钢底部与底梁上翼缘焊缝产生裂纹.位移2.0 Δ_y 时一层下部鱼尾板右端明显屈曲,鱼尾板与



图7 SPSW-SO试验现象

Fig.7 Test phenomena of SPSW-SO

底梁上翼缘焊缝撕裂.在拉力场和框架侧移内力作用下,二层槽钢顶部与顶梁下翼缘焊缝撕裂(图7(a)),右柱柱脚轻微鼓曲.二层钢板墙右上角沿对角线方向撕裂(图7(b)),中梁左端腹板和左柱柱脚轻微鼓曲.

极限阶段:位移2.5 Δ_y 时荷载达到峰值,正反方向最大荷载分别为516.48 kN、-479.08 kN,此时一、二层钢板墙面外变形分别为40 mm、38 mm.随着循环位移增大,鱼尾板与框架间焊缝裂纹,以及钢板墙角部、中部焊缝裂纹继续发展,鱼尾板与框架焊缝撕裂后,在拉力场作用下卷起(图7(c)),由于钢板墙与框架连接焊缝长度逐渐减小,承受水平荷载的钢板墙面积随之减小,试件承载力逐渐下降.位

移 $2.5\Delta_y$ 第一循环反向加载时,中梁左端下翼缘处柱壁撕裂(图7(d)).第二循环正向加载时,二层钢板墙中心撕裂.第三循环正向加载时,一层钢板墙中心撕裂(图7(e)).第三循环反向加载时,中梁右端下翼缘与柱壁焊缝撕裂.位移 $3.5\Delta_y$ 时,水平荷载为414.25 kN,降至峰值荷载85%以下,一层槽钢顶部与中梁下翼缘焊缝产生裂纹.右柱脚严重鼓曲(图7(f)),中梁右端上翼缘与柱壁焊缝撕裂.位移 $4.0\Delta_y$ 第三循环,试验结束.最终破坏形态见图7(g).

1.4.4 试件SPSW-BSO

试件SPSW-BSO一、二层钢板墙初始面外变形分别为3 mm、5 mm.

弹性阶段:正向荷载200 kN时,两层钢板墙均发生微小的面外变形,二层钢板墙沿左上至右下对角线屈服.正向荷载300 kN时,二层钢板墙屈曲形成,一层钢板墙屈曲形成3个半波,拉力带形成.正向荷载350 kN时,左柱柱脚钢管外侧屈服.

弹塑性阶段:正向荷载400 kN时,荷载-位移曲线出现明显的转折,取屈服位移 Δ_y 为20 mm,此时一、二层钢板墙面外变形分别为15 mm、16 mm.反向至400 kN时,右柱柱脚外侧钢管屈服. $1.5\Delta_y$ 位移时,一层左侧槽钢下端与底梁上翼缘焊缝完全撕裂(图8(a)),同时相邻鱼尾板与底梁上翼缘焊缝撕裂.

极限阶段:位移 $2.0\Delta_y$ 时,荷载达到峰值,正反方向最大荷载分别为468 kN、-444 kN.此时一、二层钢板墙最大面外变形分别为24 mm、29 mm.左柱柱脚轻微鼓曲.一层下部鱼尾板右侧焊缝产生裂纹,洞口处钢梁缺少钢板墙约束,中梁发生了明显弯曲变形,右端上翼缘与柱壁焊缝撕裂(图8(b)).位移 $2.5\Delta_y$ 时,右柱柱脚鼓曲加重,底梁上翼缘上方约50 mm处右柱脚四周鼓曲,一层下部鱼尾板两端与钢板墙焊缝均被撕裂(图8(c)). $3.0\Delta_y$ 位移时,正反方向水平荷载分别为402.7 kN、-377.8 kN,接近峰值荷载85%.此时,一、二层钢板墙最大面外变形分别为34 mm、37 mm.中梁右端上翼缘与柱壁焊缝产生裂纹,一层钢板墙中部偏右下位置撕裂(图8(d)),二层左侧加劲肋上端与顶梁下翼缘焊缝产生裂纹,鱼尾板与顶梁下翼缘焊缝亦被撕裂.位移 $3.5\Delta_y$ 时正反方向水平荷载分别为361.5 kN、-343.3 kN,试验结束.最终破坏形态见图8(e).

2 试验结果分析

2.1 滞回曲线

滞回曲线是试件在低周往复荷载作用下的荷载-位移曲线,它综合体现了结构的抗震性能,也是

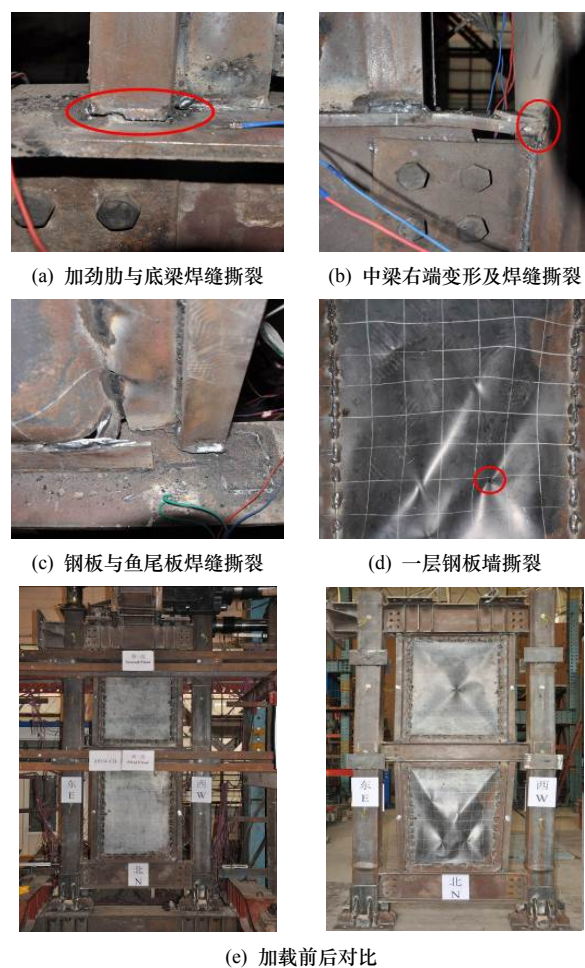


图8 SPSW-BSO试验现象

Fig.8 Test phenomena of SPSW-BSO

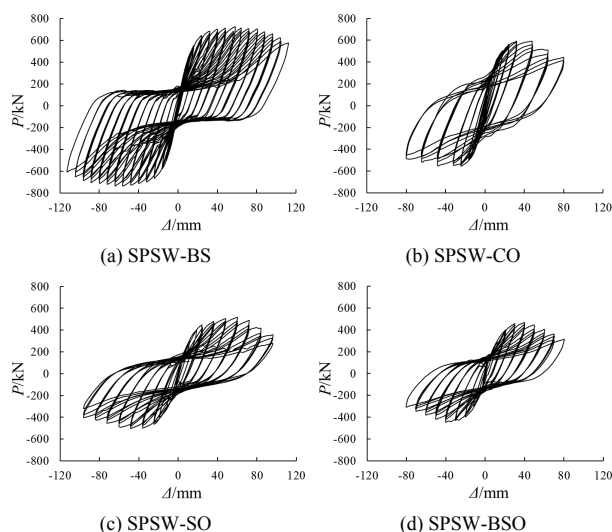


图9 滞回曲线

Fig.9 Hysteretic curves

结构弹塑性动力响应的主要依据^[18]. 试验试件滞回曲线如图9所示.

水平荷载达到峰值前,试件SPSW-BS滞回环呈梭形.进入位移控制阶段后,随着位移增大,滞回曲线出现捏缩,呈反S型.产生捏缩的原因是:正向加载时钢板墙屈曲形成拉力场,卸载后反向加载

时,钢板墙产生“呼吸效应”,形成反向拉力场,此时水平荷载主要由方钢管混凝土框架承担。

与试件SPSW-BS相比,试件SPSW-CO洞口周围设置了贯穿全跨和层高的槽钢,钢板墙宽厚比减小,同时,槽钢与框架焊接连接,参与抵抗水平荷载。因此,试件SPSW-CO的滞回曲线在试件屈服前未发生刚度退化,且屈服后其滞回环比试件SPSW-BS更饱满。峰值荷载前后,试件SPSW-CO各级滞回环呈梭形(图9(b))。随着位移增大,滞回曲线出现捏缩现象,滞回环变为反S型。

试件SPSW-SO水平荷载达到峰值后,钢板墙承担的荷载迅速减少,框架承担的荷载增大,加速了框架破坏。在滞回曲线的荷载下降段,试件SPSW-BS的水平荷载主要由钢板墙承担,而试件SPSW-SO主要由框架承担,因此,试件SPSW-SO下降段的刚度小于试件SPSW-BS,荷载下降较快。

试件SPSW-BSO的滞回曲线与试件SPSW-SO相似,水平荷载达到峰值后下降较快。试件SPSW-BSO采用了两边开洞的构造形式,虽然可有效避免拉力场对框架柱的附加弯矩作用,但开洞降低了钢板墙自身承载力,同时加载后期竖向加劲肋未能给拉力场提供足够锚固。因此,试件SPSW-BSO的承载力低于试件SPSW-BS。

2.2 骨架曲线

骨架曲线是每级加载第一次循环水平荷载峰值点的连线,反映了构件受力与变形的各个不同阶段及特性,也是确定恢复力模型中特征点的重要依据^[18]。试验试件骨架曲线如图10所示。四个试件均有明确的弹性阶段、弹塑性阶段和极限破坏阶段。

对比四个试件的骨架曲线可知,钢板墙开洞降

低了试件的承载能力,由于试件SPSW-CO设置了较密的槽钢且槽钢与框架连接共同抵抗水平荷载,试件SPSW-CO的承载力降低较小。水平荷载达到峰值后,荷载逐渐降低。试件SPSW-BS荷载下降平缓。试件SPSW-CO柱脚混凝土未浇灌密实,柱脚较早形成塑性铰,荷载下降稍快。试件SPSW-SO与试件SPSW-BSO由于洞口加劲肋与框架连接破坏较早,钢板墙失去锚固,荷载下降较快。

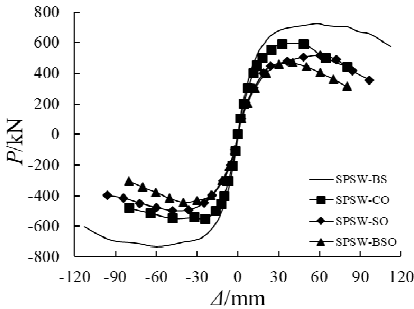


图10 骨架曲线
Fig.10 Skeleton curves

2.3 延性

采用通用屈服弯矩法确定试件屈服位移 Δ_y 。根据各试件骨架曲线得到的主要试验结果见表2。

试件SPSW-BS正反方向延性系数达到6.0以上,表明方钢管混凝土框架内置未开洞薄钢板墙能够充分发挥两类结构构件的性能,具有优异的延性。试件SPSW-CO左柱柱脚混凝土未浇筑密实,影响了试件承载力和延性。试件SPSW-SO与SPSW-BSO洞口加劲肋与框架焊缝在反复荷载作用下撕裂,导致部分钢板墙失去锚固而退出工作,钢板墙的性能未充分发挥,延性系数相对较低。因此,为了保证开洞薄钢板墙拉力带的充分发展,洞口边缘加劲肋需具有足够的强度、刚度及连接强度。

表2 试验结果
Tab.2 Test results

试件	加载方向	P_y /kN	Δ_y /mm	Δ_y/H	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm	Δ_{max}/H	P_u /kN	Δ_u /mm	Δ_u/H	$\mu=\Delta_u/\Delta_y$
SPSW-BS	推	569.8	17.41	1/184	724.8	58.25	1/55	616.1	104.62	1/31	6.0
	拉	588.4	16.97	1/189	734.6	56.47	1/57	624.4	109.14	1/29	6.4
SPSW-CO	推	476.5	15.85	1/203	590.0	48.08	1/67	501.5	63.74	1/50	4.0
	拉	476.6	14.50	1/221	551.6	24.37	1/132	480.6	80.23	1/40	5.5
SPSW-SO	推	415.0	20.47	1/157	516.5	60.30	1/53	439.0	80.09	1/40	3.9
	拉	403.1	19.31	1/166	499.5	48.22	1/67	424.5	81.37	1/39	4.2
SPSW-BSO	推	379.6	19.16	1/168	467.9	40.16	1/80	397.7	61.70	1/52	3.2
	拉	358.4	16.44	1/195	444.4	40.04	1/80	377.8	60.33	1/53	3.7

注: H 为层高; P_y 为屈服荷载; Δ_y 为屈服荷载对应位移; P_{max} 为峰值荷载; Δ_{max} 为峰值荷载对应位移; P_u 为极限荷载; Δ_u 为极限荷载对应位移。

2.4 耗能能力

试件耗能能力用等效粘滞阻尼系数 h_e 衡量。按式(1)计算,各部分面积如图11所示^[19]。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \tag{1}$$

式中: $S_{ABC}+S_{CDA}$ 为滞回环的面积; $S_{OBE}+S_{ODF}$ 为相应

三角形的面积,代表结构的弹性应变能。

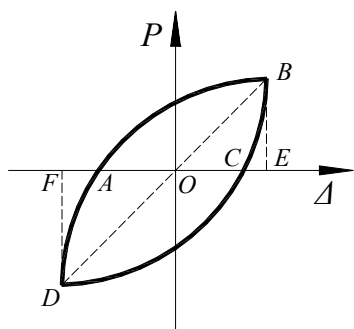


图11 等效粘滞阻尼系数定义

Fig.11 Definition of equivalent viscous damping coefficients

各试件的等效粘滞阻尼系数见图12。

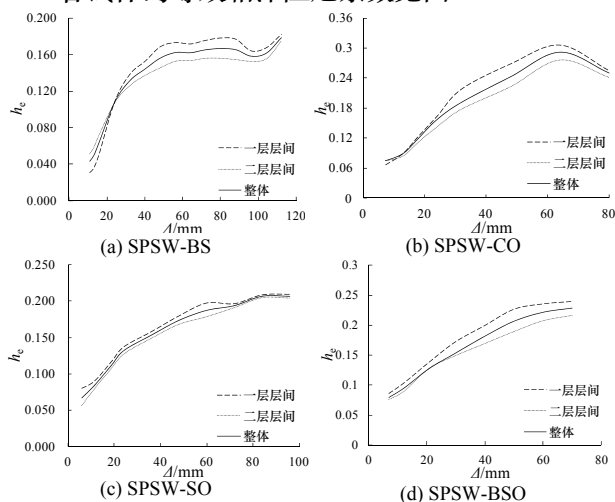


图12 等效粘滞阻尼系数 h_e

Fig.12 Equivalent viscous damping coefficients h_e

试件SPSW-BE水平荷载达到峰值前,二层钢板墙耗能较多。水平荷载达到峰值后,一层钢板墙耗能逐渐超过二层。其原因为:峰值荷载时钢板墙已大面积屈服,钢材的塑性已充分开展。同时,由于柱脚形成塑性铰导致一层刚度下降,上、下两层刚度出现差异,一层刚度较小,塑性变形耗能更多。总体而言,一、二层耗能基本相等,两层钢板墙均充分发挥了钢材的塑性性能。试件SPSW-CO水平荷载达到峰值前,两层耗能几乎相等。水平荷载达到峰值后,由于柱脚破坏严重,一层刚度下降,层间位移增大,导致一层耗能更多。试件SPSW-SO和SPSW-BSO槽钢与钢梁间的焊缝破坏导致部分钢板墙退出工作,整体刚度下降。槽钢焊缝破坏最先发生在试件SPSW-SO的二层和SPSW-BSO的一层。因此,试件SPSW-SO,二层耗能大于一层,试件SPSW-BSO,一层耗能大于二层。

试件SPSW-CO槽钢布置较密,钢板墙宽厚比较小,先屈服后屈曲,因此滞回曲线最饱满,耗能能力最好。其他三个试件钢板墙宽厚比相对较大,钢

板墙先屈曲后屈服,卸载后反向加载过程中,钢板墙产生“呼吸效应”,滞回曲线捏缩较严重。试件SPSW-SO与SPSW-BSO的耗能性能优于试件SPSW-BE。

2.5 刚度退化

进入弹塑性阶段后,试件刚度随位移的增大而退化。试件刚度可用割线刚度表示,割线刚度 K_i 按式(2)计算^[19]:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: $+P_i$ 、 $-P_i$ 为第*i*次循环正、反向峰值荷载;
 $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 为第*i*次循环正、反向峰值荷载对应的位移。

试验试件刚度如图13所示。试件屈服前,随着荷载增大,钢板墙逐渐屈服,各试件刚度迅速退化。试件屈服后,钢板墙承担的荷载逐渐减小,框架承担的荷载逐渐增大^[20],由于钢管混凝土框架前期承担荷载较少,尚未达到极限,且其延性较好,试件刚度下降逐渐平缓。

试件SPSW-BE与SPSW-SO一层层间刚度始终大于二层。水平荷载达到峰值前,两个试件的上下两层刚度退化趋势一致。水平荷载达到峰值后,试件SPSW-BE一层刚度降低较快。加载后期试件SPSW-SO两层刚度退化曲线斜率基本相同。试件SPSW-CO和SPSW-BSO在屈服荷载前一层刚度大于二层,但一层刚度下降较快,两个试件刚度退化曲线均在屈服位移处相交,屈服位移后,一层刚度小于二层,且一层刚度下降较快。

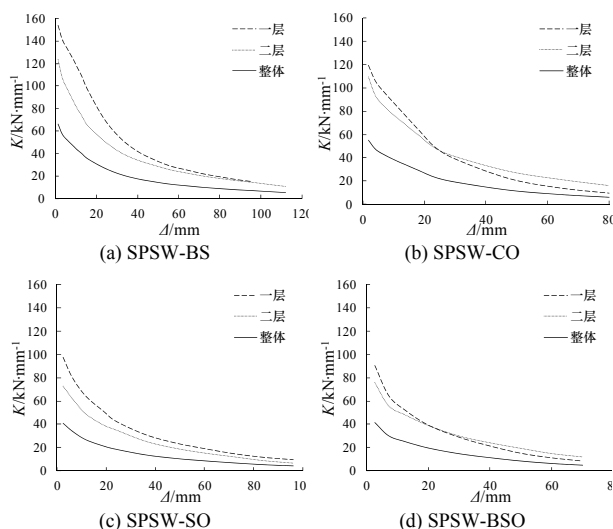


图13 刚度退化

Fig.13 Stiffness degeneration

2.6 承载力退化

在同一级加载的各循环中,承载力随反复加载

次数的增加而降低,承载力退化可用承载力降低系数 λ_i 表征^[19]. λ_i 可按式(3)计算:

$$\lambda_i = \frac{P_j^{i+1}}{P_j^i} \quad (3)$$

式中: P_j^i 、 P_j^{i+1} 为 j 倍屈服位移时,第 i 、 $i+1$ 次循环的峰值荷载.

试验试件承载力退化如图14所示.由图可知,承载力退化系数最小值为0.848,峰值荷载前承载力退化系数均大于0.95.表明试件强度退化小,不会发生突然的强度破坏.由于槽钢与钢梁连接焊缝撕裂,开洞薄钢板墙试件的承载力退化程度略大于未开洞薄钢板墙试件.

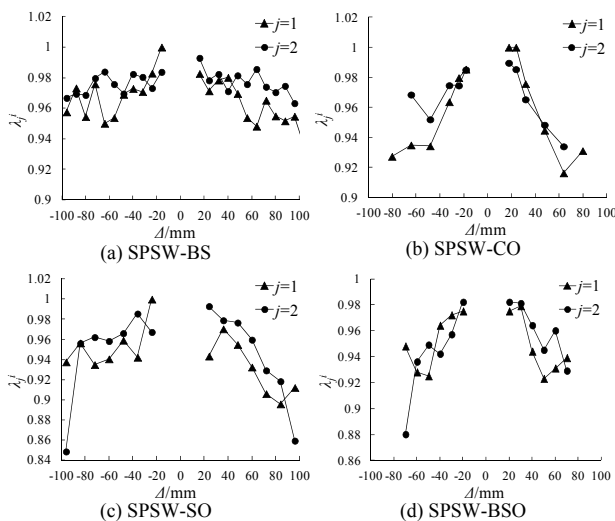


图14 承载力退化

Fig.14 Degeneration of bearing capacity

2.7 受力机理和破坏机制分析

试件 SPSW-BS 水平荷载小于钢板墙屈曲荷载时,钢板墙处于平面应力状态,结构刚度较大.水平位移较小时,荷载主要由钢板墙承担,屈服荷载时,钢板墙屈曲,形成沿主拉应力场方向折痕,随着循环加载,钢板墙产生“呼吸效应”,此时钢板墙丧失大部分承载能力,水平荷载主要由框架承担,在滞回曲线中体现为滞回环的捏缩.采用位移控制加载后,钢板墙四角先后撕裂.由于试件冗余度高,钢板墙角部撕裂对承载力影响较小,水平荷载随着位移的增大而增加.水平荷载达到峰值时,由于方钢管混凝土柱具有较高的承载力和延性,钢板墙的屈曲后性能发挥充分,破坏较为严重,同时方钢管混凝土柱柱脚发生鼓曲.水平荷载达到峰值后,随着位移增大,钢板墙和柱脚的塑性继续发展,钢梁未发生明显破坏,最终试件由于柱脚形成塑性铰而破坏.滞回曲线呈反“S”型,耗能能力略差.试件 SPSW-BS 延性系数平均为 6.20,表明方钢管混凝土

框架内置未开洞薄钢板墙结构具有良好的延性.

试件 SPSW-CO 设置了较密的槽钢,钢板墙被分隔成宽厚比较小的区格.试件屈服时,各区格面外变形较小,钢板墙屈曲与屈服几乎同时发生.虽然钢板墙宽厚比较小,侧移较大时,钢板墙内主应力仍形成了拉力场.较高的屈曲荷载使试件具有较好的耗能能力.槽钢与边缘构件焊接连接,使槽钢与边缘构件共同抵抗水平荷载,一定程度上弥补了钢板墙开洞导致的承载力损失.

试件 SPSW-SO 和 SPSW-BSO 的受力机理与未开洞薄钢板墙类似.槽钢与边缘构件焊缝破坏较早,随后钢板墙角部与边缘构件焊缝破坏,钢板墙未能得到更充分利用.因此,为了充分发挥钢板墙的屈曲后性能,必须确保槽钢具有足够的强度和刚度,并与周边框架可靠连接.同时,由于钢板墙与边缘构件焊缝破坏,钢板墙承担的水平荷载减少,框架承担的荷载增加,进入弹塑性阶段后,在水平荷载作用下框架变形较大.

3 结论

进行了三个不同开洞形式的方钢管混凝土框架内置开洞薄钢板墙试件与一个方钢管混凝土框架内置未开洞薄钢板墙试件的拟静力试验,研究了开洞薄钢板墙的抗震性能,得到以下结论:

(1) 往复水平荷载作用下,四个试件中钢板墙的拉力场均发展较充分.滞回曲线为反 S 型,试件延性较好.未开洞薄钢板墙试件的延性优于开洞薄钢板墙试件.承载力退化平缓,不会发生突然的强度破坏.

(2) 中部开洞薄钢板墙被槽钢分隔为宽厚比较小的区格,钢板墙屈曲与屈服几乎同时发生.前期滞回曲线较饱满,随着钢板墙屈曲,滞回曲线逐渐捏拢,中部开洞薄钢板墙试件的耗能能力优于未开洞、单侧开洞及两侧开洞试件.

(3) 钢板墙开洞一定程度上降低了结构的承载力,但提高了耗能能力.钢板墙中部开洞试件由于设置了较密的槽钢,且槽钢参与抵抗水平荷载,承载力下降较小.

(4) 为充分发挥开洞钢板墙的性能,钢板墙洞口侧应设置槽钢加劲肋,并确保槽钢具有足够的强度、刚度及连接强度.

参考文献 References

- [1] 郭彦林,董全利.钢板剪力墙的发展与现状研究[J].钢结构,2005,20(77):1-6.

- GUO Yanlin, DONG Quanli. Research and application of steel plate shear wall in high-rise building[J]. Steel Construction, 2005, 20(77): 1-6.
- [2] THORBUM L J, KULAK G L, MONTGOMERY C J. Analysis of steel plate shear walls[R]. Alberta, Canada: University of Alberta, 1983.
- [3] 李峰, 李慧, 李振敏, 等. 交叉加劲肋钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(1): 57-62.
- LI Feng, LI Hui, LI Zhenmin, et al. Cyclic test of diagonally stiffened steel plate shear wall[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition), 2009, 41(1): 57-62.
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- HAN Linhai. Concrete-filled square steel tube structure[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [5] KAWAGUCHI J, MORINO S, SUGIMOTO T, et al. Experimental study on structural characteristics of portal frames consisting of square CFT columns[C]// Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV. Canada: American Society of Civil Engineers, 2002: 1503-1511.
- [6] 王先铁, 郝际平, 周观根, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁平面框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 8-14.
- WANG Xiantie, HAO Jiping, ZHOU Guangen, et al. Experimental research on seismic behavior of concrete-filled square steel tube columns and steel beam planar frames[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 8-14.
- [7] TOKO H, CHIAKI M. Experimental study on steel shear wall with slits[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 586-595.
- [8] CHOI I R, PARK H G. Steel plate shear walls with various infill plate designs[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(7): 785-796.
- [9] 聂建国, 朱力, 樊健生, 等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 61-69.
- NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls[J]. Journal of Building Structure, 2013, 34(1): 61-69.
- [10] 聂建国, 朱力, 樊健生, 等. 开洞加劲钢板剪力墙的抗侧承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7): 79-88.
- NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Lateral force resistant capacity of stiffened steel plate shear walls with openings[J]. Journal of Building Structure, 2013, 34(7): 79-88.
- [11] 朱力, 聂建国, 樊健生. 开洞加劲钢板剪力墙的抗侧刚度分析[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 200-210.
- ZHU Li, NIE Jianguo, FAN Jiansheng. Lateral stiffness of steel plate shear walls with openings[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 200-263.
- [12] 郝际平, 曹春华, 王迎春, 等. 开洞薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 79-85.
- HAO Jiping, CAO Chunhua, WANG yingchun, et al. Test On thin steel plate shear wall with opening under cyclic loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2): 79-85.
- [13] 李峰. 钢板剪力墙抗震性能的试验与理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- LI Feng. Experimental and theoretical investigation to earthquake resistant behavior of steel plate shear walls[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [14] AISC. Seismic provisions for structural steel buildings: ANSI/AISC 341-10 [S]. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [15] 童根树, 陶文登. 竖向槽钢加劲钢板剪力墙剪切屈曲[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 1-9.
- TONG Genshu, TAO Wendeng. Elastic shear buckling of shear walls strengthened vertically by closed section stiffeners[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 1-9.
- [16] 王先铁, 马尤苏夫, 郝际平, 等. 钢板剪力墙边缘构件的计算方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 175-182.
- WANG Xiantie, MA Yousufu, HAO Jiping, et al. Calculation methods for boundary elements in steel plate shear walls[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 175-182.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [18] 熊仲明, 王社良. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- XIONG Zhongming, WANG Sheliang. Structure test of civil engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [19] 姚振纲, 刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- YAO Zhengang, LIU Zuhua. Test of building structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [20] 王先铁, 白连平, 王连坤, 等. 方钢管混凝土框架-十字加劲薄钢板剪力墙的力学性能研究[J]. 地震工程与工程震动, 2013, 33(2): 103-109.
- WANG Xiantie, BAI Lianping, WANG Liankun, et al. Study on mechanical behavior of concrete-filled square steel tubular frame-cross-stiffened thin steel plate shear walls[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 103-109.

(编辑 桂智刚)